

Soichi Endo, et al  
09/988,633  
Filed: Nov. 20, 2001

日 本 国 特 許 庁

JAPAN PATENT OFFICE

McDermott, Will & Emery

別紙添付の書類に記載されている事項は下記の出願書類に記載されている事項と同一であることを証明する。

This is to certify that the annexed is a true copy of the following application as filed with this Office

出 願 年 月 日

Date of Application:

2001年10月12日

出 願 番 号

Application Number:

特願2001-315450

出 願 人

Applicant(s):

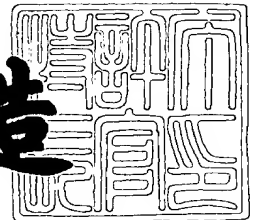
住友電気工業株式会社



2001年11月26日

特許庁長官  
Commissioner,  
Japan Patent Office

及川耕造



出証番号 出証特2001-3102289

【書類名】 特許願

【整理番号】 101Y0312

【提出日】 平成13年10月12日

【あて先】 特許庁長官殿

【国際特許分類】 G02B 6/00  
G02F 1/35

【発明者】

    【住所又は居所】 神奈川県横浜市栄区田谷町1番地 住友電気工業株式会  
社横浜製作所内

    【氏名】 遠藤 壮一

【発明者】

    【住所又は居所】 神奈川県横浜市栄区田谷町1番地 住友電気工業株式会  
社横浜製作所内

    【氏名】 岡本 和弘

【発明者】

    【住所又は居所】 神奈川県横浜市栄区田谷町1番地 住友電気工業株式会  
社横浜製作所内

    【氏名】 高城 政浩

【発明者】

    【住所又は居所】 神奈川県横浜市栄区田谷町1番地 住友電気工業株式会  
社横浜製作所内

    【氏名】 角井 素貴

【特許出願人】

    【識別番号】 000002130

    【氏名又は名称】 住友電気工業株式会社

【代理人】

    【識別番号】 100088155

    【弁理士】

    【氏名又は名称】 長谷川 芳樹

【選任した代理人】

【識別番号】 100089978

【弁理士】

【氏名又は名称】 塩田 辰也

【選任した代理人】

【識別番号】 100092657

【弁理士】

【氏名又は名称】 寺崎 史朗

【選任した代理人】

【識別番号】 100110582

【弁理士】

【氏名又は名称】 柴田 昌聰

【先の出願に基づく優先権主張】

【出願番号】 特願2000-395546

【出願日】 平成12年12月26日

【手数料の表示】

【予納台帳番号】 014708

【納付金額】 21,000円

【提出物件の目録】

【物件名】 明細書 1

【物件名】 図面 1

【物件名】 要約書 1

【包括委任状番号】 0106993

【プルーフの要否】 要

【書類名】 明細書

【発明の名称】 増幅用光ファイバ及びそれを含む光ファイバ増幅器

【特許請求の範囲】

【請求項 1】 励起光が供給されることにより信号光を増幅する増幅用光ファイバであって、

希土類元素が添加されたコア領域と、 $1.5\mu\text{m}$ 以下の零分散波長と、そして、 $1.1\mu\text{m}$ 以上かつ $1.5\mu\text{m}$ 以下の実効カットオフ波長を有する増幅用光ファイバ。

【請求項 2】 前記コア領域は、エルビウム元素を含むことを特徴とする請求項 1 記載の増幅用光ファイバ。

【請求項 3】 前記コア領域内に添加されたエルビウム元素の濃度は、 $3000\text{wt.ppm}$ 以下であり、波長 $1.53\mu\text{m}$ における吸収損失は、 $10\text{dB}/\text{m}$ 以上であることを特徴とする請求項 2 記載の増幅用光ファイバ。

【請求項 4】 波長 $1.55\mu\text{m}$ において $4.0\mu\text{m}$ 以上かつ $9.0\mu\text{m}$ 以下のモードフィールド径を有することを特徴とする請求項 1 記載の増幅用光ファイバ。

【請求項 5】 波長 $1.55\mu\text{m}$ において $4.0\mu\text{m}$ 以上かつ $7.5\mu\text{m}$ 以下のモードフィールド径を有することを特徴とする請求項 4 記載の増幅用光ファイバ。

【請求項 6】 所定波長の励起光を出力する励起光光源と、  
前記励起光が供給されることにより信号光を増幅する増幅用光ファイバとを備え、

前記増幅用光ファイバは、希土類元素が添加されたコア領域と、励起光波長以下の零分散波長と、 $1.1\mu\text{m}$ 以上かつ励起光波長以下の実効カットオフ波長を有する光ファイバ増幅器。

【請求項 7】 光学的に多段接続され、それぞれが励起光が供給されることにより信号光を増幅する複数の増幅用光ファイバと、

前記複数の増幅用光ファイバに前記励起光を供給する励起光供給システムとを備え、

前記複数の増幅用光ファイバのうち受信側の増幅用光ファイバは、希土類元素が添加されたコア領域と、励起光波長以下の零分散波長と、 $1.1\mu\text{m}$ 以上かつ励起光波長以下の実効カットオフ波長を有する光ファイバ増幅器。

【請求項 8】 前記励起光供給システムは、励起光光源を含むことを特徴とする請求項 7 記載の光ファイバ増幅器。

【請求項 9】 前記増幅用光ファイバのコア領域は、エルビウム元素を含むことを特徴とする請求項 6 又は 7 記載の光ファイバ増幅器。

【請求項 10】 前記増幅用光ファイバは、コア領域内に添加されるエルビウム元素の濃度が、 $3000\text{wt.ppm}$ 以下であり、波長 $1.53\mu\text{m}$ における吸収損失が、 $10\text{dB/m}$ 以上であることを特徴とする請求項 9 記載の光ファイバ増幅器。

【請求項 11】 前記増幅用光ファイバは、波長 $1.55\mu\text{m}$ において $4.0\mu\text{m}$ 以上かつ $9.0\mu\text{m}$ 以下のモードフィールド径を有することを特徴とする請求項 6 又は 7 記載の光ファイバ増幅器。

【請求項 12】 前記増幅用光ファイバは、波長 $1.55\mu\text{m}$ において $4.0\mu\text{m}$ 以上かつ $7.5\mu\text{m}$ 以下のモードフィールド径を有することを特徴とする請求項 11 記載の光ファイバ増幅器。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】

この発明は、励起光が供給されることにより信号光を増幅する増幅用光ファイバ、及びそれを含む光ファイバ増幅器に関するものである。

【0002】

【従来の技術】

光ファイバ増幅器は、光導波領域に相当するコア領域に希土類元素が添加された石英系の増幅用光ファイバが光増幅媒体として適用された光学デバイスであり、励起光が供給されることにより、この増幅用光ファイバにおいて信号増幅が行われる。例えば、希土類元素として Er 元素がコア領域に添加された増幅用光ファイバ (EDF: Erbium-Doped Fiber) が適用された光ファイバ増幅器 (EDF

A: Erbium-Doped Fiber Amplifier) では、波長  $1.48\mu\text{m}$  の励起光が EDF に供給されることにより、Cバンド (波長  $1.53\mu\text{m}\sim 1.56\mu\text{m}$ ) あるいは Lバンド (波長  $1.57\mu\text{m}\sim 1.61\mu\text{m}$ ) の信号光が該 EDF において増幅される。

## 【0003】

また、伝搬する情報を大容量化すべく、多チャネルの信号 (互いに波長の異なる信号) を多重化して伝送する波長分割多重 (WDM: Wavelength Division Multiplexing) 伝送が行われている。WDM伝送において使用される多チャネルの多重化信号 (WDM信号) は、従来よりCバンドに属する信号であったが、更なる大容量化の要求に応えるべく、Lバンドに属する多重化信号の使用も検討されている。また、更なる大容量化を図る手段の1つとして、多重化信号の波長間隔 (信号チャネル間隔) を狭めることも検討されている。

## 【0004】

EDFAは、CバンドあるいはLバンドに属する多重化信号光 (WDM信号) を一括して増幅することができるので、CバンドあるいはLバンドにおけるWDM伝送システムにも適している。しかしながら、このようなEDFAでは、非線形光学現象の一種である四光波混合の発生が問題となる。すなわち、EDFにおいて増幅された多チャネルの多重化信号光は、パワーが大きくなっており、しかも、波長間隔が狭い。また、通常の伝送用光ファイバのモードフィールド径と比べて、EDFのモードフィールド径は小さい。これらのことから、EDFにおいて四光波混合が生じ易い。そして、四光波混合が生じると、各信号の波形劣化が発生し、伝送品質が劣化する。

## 【0005】

そこで、特開平10-242556号公報には、四光波混合の発生を抑制するためのEDFが開示されている。この公報に開示されたEDFは、波長  $1.55\mu\text{m}$  において  $9\mu\text{m}$  以上の有効コア径と、 $1.53\mu\text{m}$  から  $1.56\mu\text{m}$  の範囲外の零分散波長を有する。このEDFが適用されたEDFAは、Cバンドにおける多チャネルの多重化信号光を一括して増幅することができ、その際に四光波混合の発生を抑制する。

## 【0006】

## 【発明が解決しようとする課題】

発明者らは、従来の光ファイバ増幅器について詳細に検討した結果、以下のような課題を発見した。すなわち、Cバンドに加えLバンドにおいても信号増幅を行う場合、バンド間非線形光学現象、特に非縮退型四光波混合が問題となり、また、各信号光と励起光との間の非縮退型四光波混合も問題となる。なお、非縮退型四光波混合とは、2つの波長の光が零分散波長を挟む配置となる場合に位相整合条件が成立することに起因して生じる非線形光学現象である。しかしながら、上記特開平10-242556号公報に開示されたEDFは、非縮退型四光波混合については何ら対策がなされていないことから、非縮退型四光波混合に起因した信号波形劣化が生じて、伝送品質が劣化する可能性を含んでいる。

## 【0007】

特に、Lバンドに属する多重化信号光を増幅するEDFAでは、非縮退型四光波混合の発生が問題となる。すなわち、Lバンド用EDFAは、Cバンド用EDFAと比較して、多重化されるチャネル数の増大に伴って全信号光のパワーが増大する一方、単位長さ当たりの利得が小さいことから、長尺（Cバンド用EDFAに適用されるEDFの5～10倍程度）のEDFが必要とされ、また、増幅効率が悪いことから大きな励起光パワーが必要とされる。このことから、Lバンド用EDFAは、EDFの単位断面積当たりの光エネルギー密度が高く、しかも、EDFが長尺であることにより、非縮退型四光波混合が発生し易い。

## 【0008】

この発明は、上述のような課題を解決するためになされたものであり、Lバンドにおける信号増幅に適し、信号間で発生する通常の四光波混合に対して抑制効果を有するだけでなく非縮退型四光波混合の発生をも効果的に抑制する構造を備えた増幅用光ファイバ及びそれを含む光ファイバ増幅器を提供することを目的としている。

## 【0009】

## 【課題を解決するための手段】

この発明に係る増幅用光ファイバは、コア領域に希土類元素が添加された光フ

ファイバであって、励起光が供給されることにより信号光を増幅する。なお、希土類元素が添加される領域は、コア領域全域である必要はなく、該希土類元素はコア領域の一部に添加されてもよい。特に、当該増幅用光ファイバは、使用される励起光の波長以下、具体的には  $1.5\ \mu\text{m}$  以下の零分散波長を有するとともに、 $1.1\ \mu\text{m}$  以上かつ使用される励起光の波長以下、具体的には  $1.1\ \mu\text{m}$  以上かつ  $1.5\ \mu\text{m}$  以下の実効カットオフ波長を有する。

## 【 0 0 1 0 】

一方、この発明に係る光ファイバ増幅器は、上述のような構造を備えた増幅用光ファイバ（この発明に係る増幅用光ファイバ）と、所定波長の励起光を供給するための励起光光源を備える。この場合、増幅用光ファイバの零分散波長の上限及び実効カットオフ波長の上限は、励起光波長によって与えられる。また、この発明に係る光ファイバ増幅器は、多段接続された複数の増幅用光ファイバと、これら複数の増幅用光ファイバに励起光を供給する 1 又はそれ以上の励起光光源を含む励起光供給システムを備えてもよい。この場合、信号光の進行方向から見て少なくとも最終段に位置する増幅用光ファイバとして、この発明に係る増幅用光ファイバが適用されるのが好ましい。いずれの光ファイバ増幅器も、Lバンドにおける信号増幅に適し、信号間で発生する通常の四光波混合に対して抑制効果を有するだけでなく非縮退型四光波混合の発生をも効果的に抑制する。特に、多段接続された複数の増幅用光ファイバを備えた光ファイバ増幅器では、少なくとも信号光のパワーが最大となる最終段に位置する増幅用光ファイバに、この発明に係る増幅用光ファイバが適用されるので、非縮退型四光波混合の発生をより効果的に抑制することを可能にする。

## 【 0 0 1 1 】

なお、この発明に係る増幅用光ファイバにおいて、零分散波長及び実効カットオフ波長それぞれが上述の範囲に設定されることにより、非縮退型四光波混合の発生が抑制される。また、この明細書において、実効カットオフ波長とは、ITU-Tの規格に従う長さ  $2\text{ m}$  でのカットオフ波長である。

## 【 0 0 1 2 】

この発明に係る増幅用光ファイバにおいて、コア領域に添加（コア領域の一部



に添加される場合も含む) された希土類元素は、がエルビウム (E r) 元素であるのが好ましい。この場合、CバンドあるいはLバンドにおける信号増幅が可能になるからである。

## 【 0 0 1 3 】

さらに、この発明に係る増幅用光ファイバにおいて、コア領域内に添加される E r 元素の濃度は、3 0 0 0 w t . p p m 以下、好ましくは 2 5 0 0 w t . p p m 以下、より好ましくは 2 0 0 0 w t . p p m 以下である。また、波長 1 . 5 3  $\mu$  m のにおける吸収損失は、1 0 d B / m 以上である。この場合、濃度消光を起こすこと無く当該増幅用光ファイバの短尺化が可能になることから、Lバンド用 E D F A における光増幅用媒体として利用できる。

## 【 0 0 1 4 】

この発明に係る増幅用光ファイバにおいて、波長 1 . 5 5  $\mu$  m におけるモードフィールド径は、4 . 0  $\mu$  m 以上かつ 9 . 0  $\mu$  m 以下、好ましくは 4 . 0  $\mu$  m 以上 7 . 5  $\mu$  m 以下である。モードフィールド径が上述の範囲に設定されることにより、非線形光学現象の発生がさらに抑制される。

## 【 0 0 1 5 】

## 【発明の実施の形態】

以下、この発明に係る増幅用光ファイバ及びそれを含む光ファイバ増幅器の各実施形態を、図 1 ～図 1 3 を用いて説明する。なお、図面の説明において同一の要素には同一の符号を付し、重複する説明を省略する。

## 【 0 0 1 6 】

## (第 1 実施形態)

まず、この発明に係る増幅用光ファイバ及び光ファイバ増幅器の第 1 実施形態について説明する。図 1 は、第 1 実施形態に係る光ファイバ増幅器 1 の構成を示す図である。この光ファイバ増幅器 1 は、入力端 1 1 から出力端 1 2 へ向けて順に、光アイソレータ 2 1、光カップラ 4 0、増幅用光ファイバ 3 1 及び光カップラ 4 1 が設けられている。

## 【 0 0 1 7 】

光カップラ 4 0 には励起光源 5 0 が接続されており、また、光カップラ 4 1 には励

起光源 5 1 が接続されている。光アイソレータ 2 1 は、入力端 1 1 から光カップラ 4 0 への順方向には光を通過させるが、逆方向には光を通過させない。増幅用光ファイバ 3 1 は、励起光（例えば波長  $1.48\ \mu\text{m}$  の光）が供給されることにより多チャンネルの多重化信号光（例えば C バンドあるいは L バンドに属する波長の光）を増幅する石英系の光ファイバであって、コア領域の少なくとも一部に希土類元素（例えば Er 元素）が添加されている。光カップラ 4 0 は、励起光源 5 0 より到達した励起光を増幅用光ファイバ 3 1 へ出力し、光アイソレータ 2 1 より到達した信号光を増幅用光ファイバ 3 1 へ出力する。光カップラ 4 1 は、励起光源 5 1 より到達した励起光を増幅用光ファイバ 3 1 へ出力し、増幅用光ファイバ 3 1 より到達した信号光を出力端 1 2 へ出力する。励起光源 5 0、5 1 それぞれは、例えば半導体レーザ光源であり、増幅用光ファイバ 3 1 に添加された希土類元素を励起し得る波長の励起光を出力する。

## 【 0 0 1 8 】

この光ファイバ増幅器 1 において、励起光源 5 0 から出力された励起光は、光カップラ 4 0 を経て増幅用光ファイバ 3 1 に順方向に供給される。また、励起光源 5 1 から出力された励起光は、光カップラ 4 1 を経て増幅用光ファイバ 3 1 に逆方向に供給される。入力端 1 1 から入力された多重化信号光は、光アイソレータ 2 1 及び光カップラ 4 0 を通過して増幅用光ファイバ 3 1 に入射し、この増幅用光ファイバ 3 1 において増幅される。そして、増幅用光ファイバ 3 1 から出力された多重化信号光（増幅された多重化信号光）は、光カップラ 4 1 を経て出力端 1 2 より出力される。

## 【 0 0 1 9 】

図 2 (a) は、増幅用光ファイバ 3 1 における断面構造の一例を示す図である。図 2 (a) に示されたように、増幅用光ファイバ 3 1 は、所定軸に沿って伸びた、屈折率  $n_1$  を有する外径  $a$  のコア領域 3 1 1 と、該コア領域 3 1 1 の外周に設けられた、屈折率  $n_2$  ( $< n_1$ ) のクラッド領域 3 1 2 とを備える。また、図 2 (b) は、図 2 (a) に示された増幅用光ファイバの屈折率プロファイルである。この屈折率プロファイル 3 5 0 は、図 2 (a) 中の線 L（増幅用光ファイバ 3 1 の光軸と直交する線）上に位置する各部の屈折率を示し、領域 3 5 1 は、コ

ア領域 3 1 1 の線 L 上に位置する部位の屈折率、領域 3 5 2 は、クラッド領域 3 1 2 の線 L 上に位置する部位の屈折率をそれぞれ示す。

【 0 0 2 0 】

ここで、屈折率  $n_1$  のコア領域 3 1 1 と屈折率  $n_2$  のクラッド領域 3 1 2 との比屈折率差  $\Delta n$  は、以下の式 (1) で与えられる。

【 0 0 2 1 】

$$\Delta n = ((n_1)^2 - (n_2)^2) / 2 (n_1)^2 \quad \dots (1)$$

【 0 0 2 2 】

なお、図 2 (a) 及び (b) に示された断面構造及び屈折率プロファイルは、この発明に係る増幅用光ファイバ 3 1 を実現するための代表例であって、種々の変形が可能である。当該増幅用光ファイバ 3 1 に適用可能な屈折率プロファイルとしては、例えば、米国特許第 5, 8 3 8, 8 6 7 号の図 7 ~ 図 9 に示されたような屈折率プロファイルがある。これら屈折率プロファイルには、コア領域 3 1 1 が単一ガラス層で構成された屈折率プロファイルと、屈折率の異なる複数のガラス層で構成された屈折率プロファイルが含まれるが、いずれの場合も該コア領域 3 1 1 全体に希土類元素が添加される必要はなく、該コア領域 3 1 1 の少なくとも一部に希土類元素が添加されていればよい。

【 0 0 2 3 】

特に、この第 1 実施形態における増幅用光ファイバ 3 1 (この発明に係る増幅用光ファイバ) は、励起光波長以下、具体的には  $1.5 \mu\text{m}$  以下の零分散波長を有するとともに、 $1.1 \mu\text{m}$  以上かつ励起光波長以下、具体的には  $1.1 \mu\text{m}$  以上かつ  $1.5 \mu\text{m}$  以下の実効カットオフ波長を有する。零分散波長が励起光波長以下であることにより、励起光及び複数チャネルの多重化信号光のうちいずれか 2 つの波長の光は、波長軸から見て、零分散波長を挟む配置となることがない。これにより、非縮退型四光波混合の発生が抑制される。また、増幅用光ファイバ 3 1 の実効カットオフ波長が励起光波長以下であることにより、増幅用光ファイバ 3 1 は、励起光波長でも単一モードが保証される。一方、増幅用光ファイバ 3 1 の実効カットオフ波長が  $1.1 \mu\text{m}$  以上であることにより、増幅用光ファイバ 3 1 は、曲げロスが小さい。

## 【 0 0 2 4 】

増幅用光ファイバ 3 1 の曲げロス、増幅用光ファイバ 3 1 の構造に大きく依存する。すなわち、実効カットオフ波長が長いほど、また、比屈折率差  $\Delta n$  が大きいほど、曲げロスは小さい。一方、光ファイバ増幅器 1 はモジュール化されることから、増幅用光ファイバ 3 1 は、ボビンに巻き付けられるか、あるいは、束取り状態とされ、しかも、収納の観点からは巻き径が小さいことが望まれる。図 3 は、この増幅用光ファイバ 3 1 の複数サンプルに関し、波長  $1.55 \mu\text{m}$  における曲げロスと実効カットオフ波長との関係を示すグラフである。用意されたサンプルは、比屈折率差  $\Delta n$  が 0.7% のサンプルと、0.5% のサンプルであり、グラフ G 3 1 0 は、比屈折率差  $\Delta n$  が 0.5% のサンプル、グラフ G 3 2 0 は、比屈折率差  $\Delta n$  が 0.7% のサンプルにおける上記関係をそれぞれ示す。これらサンプルは、いずれも 67 m の長さ、波長  $1.53 \mu\text{m}$  において  $10 \text{ dB/m}$  の吸収損失、 $1000 \text{ dB}$  の吸収条長積 (unsaturated absorption) を有し、直径  $35 \text{ mm}$  (巻き径) で巻かれた状態で測定される。なお、測定波長は  $1.55 \mu\text{m}$  ( $1550 \text{ nm}$ ) である。

## 【 0 0 2 5 】

このグラフから分かるように、実効カットオフ波長が  $1.03 \mu\text{m}$  以上であれば、増幅用光ファイバ 3 1 の波長  $1.55 \mu\text{m}$  における曲げロスは  $0.05 \text{ dB}$  以下であり、実効カットオフ波長が  $1.1 \mu\text{m}$  以上であれば、増幅用光ファイバ 3 1 の波長  $1.55 \mu\text{m}$  における曲げロスは  $0.003 \text{ dB}$  以下である。

## 【 0 0 2 6 】

増幅用光ファイバ 3 1 の零分散波長については、さらに以下のことが言える。すなわち、ビットレート  $40 \text{ Gbps}$  以上の超高速伝送では、零分散波長から少し離れた波長の信号光は、波長分散の影響によりその波形が劣化する。増幅用光ファイバ 3 1 に許容される波長分散の絶対値を  $1 \text{ ps/nm}$  以下とすると、増幅用光ファイバ 3 1 の最大長さは  $100 \text{ m}$  程度であるから、増幅用光ファイバ 3 1 の零分散波長は  $1.3 \mu\text{m}$  以上であることが望ましい。図 4 は、増幅用光ファイバの波長分散特性を示すグラフである。なお、グラフ 4 2 0 は、比較例である光ファイバの波長分散特性を示しており、該比較例の光ファイバは、 $1.3 \mu\text{m}$  未

満の零分散波長と、波長  $1.55\ \mu\text{m}$  において  $10\ \text{ps}/\text{km}/\text{nm}$  超の波長分散を有する。これに対して、グラフ G410 は、第 1 実施形態に係る増幅用光ファイバ 31 の波長分散特性を示しており、該増幅用光ファイバ 31 は、 $1.3\ \mu\text{m}$  以上の零分散波長と、波長  $1.55\ \mu\text{m}$  において  $10\ \text{ps}/\text{km}/\text{nm}$  以下の波長分散を有する。

## 【0027】

また、増幅用光ファイバ 31 のコア領域 311 の少なくとも一部には、希土類元素として Er 元素が添加されており、該増幅用光ファイバ 31 において、該コア領域 311 に添加される Er 元素の濃度は、 $3000\ \text{wt. ppm}$  以下、好ましくは  $2500\ \text{wt. ppm}$  以下、より好ましくは  $2000\ \text{wt. ppm}$  以下である。波長  $1.53\ \mu\text{m}$  における吸収損失は  $10\ \text{dB}/\text{m}$  以上である。このような構成により、増幅用光ファイバ 31 は、C バンドあるいは L バンドにおける信号増幅を可能にする。また、増幅用光ファイバ 31 は、濃度消光を起こすこと無く短尺化が可能であり、このことから、L バンド用 EDFA における光増幅用媒体として適用可能である。

## 【0028】

なお、増幅用光ファイバ 31 のコア領域 311 に添加される Er 濃度 ( $\text{wt. ppm}$ ) は、以下のように Saturation Parameter から導出される。すなわち、増幅用光ファイバ 31 における Er 濃度  $N_t\ (\text{m}^{-3})$  は、以下の式 (2) により近似的に導出することができる。

## 【0029】

$$N_t = \xi \cdot \tau / (\pi \cdot b^2) \quad \dots (2)$$

## 【0030】

ここで、 $\xi$  は Saturation Parameter ( $\text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ )、 $\tau$  は蛍光寿命 ( $\text{ms}$ )、 $b$  は Er 元素が添加された領域の半径である。Saturation Parameter  $\xi$  は実測により求められ、蛍光寿命  $\tau$  は代表値として  $10\ \text{ms}$  とされる場合が多い。また、添加領域半径  $b$  は、カットオフ波長と波長  $1.55\ \mu\text{m}$  におけるモードフィールド径から容易に算出される。このとき、Er 濃度  $N_t\ (\text{m}^{-3})$  は、ガラス ( $\text{SiO}_2$ ) 密度  $D (= 2.86\ \text{g}/\text{cm}^3)$ 、 $\text{Er}^{3+}$  の  $1\ \text{mol}$  での質量  $Z (= 16$

7.3 g)、アボガドロ数 $N (= 6.02 \times 10^{23})$ を用いて、以下の式(3)によりEr濃度 $N_s$  (wt. ppm)へ換算される。

【0031】

$$N_s \text{ (wt. ppm)} = N_t \text{ (m}^{-3}\text{)} \cdot Z / (D \cdot N) \quad \dots (3)$$

【0032】

増幅用光ファイバ31は、光導波領域に添加される希土類元素(Er元素)の濃度が高いほど、短尺化が可能である。しかしながら、Er濃度が高くなりすぎると、Erイオン間の相互作用に起因して増幅特性が劣化する。図5は、増幅用光ファイバ31における変換効率とEr濃度との関係を示すグラフである。変換効率とは、励起光エネルギーが信号エネルギーに変換される効率であって、変換効率が高いほど増幅特性に優れていることを意味する。このグラフから分かるように、Er濃度が3000 wt. ppm以下であれば、増幅用光ファイバ31における変換効率が高い。Er濃度が2500 wt. ppm以下、さらにEr濃度が200 wt. ppm以下であれば、より安定的して高い変換効率を得られる。また、Er元素とともに、濃度1 wt %以上、好ましくは3 wt %以上のAl元素が共添加されるのが好ましい。

【0033】

加えて、増幅用光ファイバ31は、波長 $1.55 \mu\text{m}$ において $4.0 \mu\text{m}$ 以上かつ $9.0 \mu\text{m}$ 以下、好ましくは $4.0 \mu\text{m}$ 以上かつ $7.5 \mu\text{m}$ 以下のモードフィールド径を有する。これにより、非線形光学現象の発生をさらに抑制することができる。

【0034】

なお、モードフィールド径は、ITU-TのPetermannIIの定義式により与えられる。また、図6は、増幅用光ファイバ31に相当する複数サンプルに関し、零分散波長と実効カットオフ波長との関係を示すグラフである。図7は、これら複数サンプルの一部に関し、波長 $1.55 \mu\text{m}$ におけるモードフィールド径と実効カットオフ波長との関係を示すグラフである。

【0035】

図6において、グラフ610は比屈折率差 $\Delta n$ が0.5%であるサンプル、グ

ラフ 6 2 0 は比屈折率差  $\Delta n$  が 0.7 % であるサンプル、グラフ 6 3 0 は比屈折率差  $\Delta n$  が 0.9 % であるサンプル、グラフ 6 4 0 は比屈折率差  $\Delta n$  が 1.1 % であるサンプル、グラフ 6 5 0 は比屈折率差  $\Delta n$  が 1.3 % であるサンプル、グラフ 6 6 0 は比屈折率差  $\Delta n$  が 1.5 % であるサンプル、グラフ 6 7 0 は比屈折率差  $\Delta n$  が 1.8 % であるサンプル、グラフ 6 8 0 は比屈折率差  $\Delta n$  が 2.1 % であるサンプルについての上記関係をそれぞれ示す。また、図 7 において、グラフ 7 1 0 は比屈折率差  $\Delta n$  が 0.7 % であるサンプル、グラフ 7 2 0 は比屈折率差  $\Delta n$  が 0.9 % であるサンプル、グラフ 7 3 0 は比屈折率差  $\Delta n$  が 1.1 % であるサンプル、グラフ 7 4 0 は比屈折率差  $\Delta n$  が 1.3 % であるサンプル、グラフ 7 5 0 は比屈折率差  $\Delta n$  が 1.5 % であるサンプル、グラフ 7 6 0 は比屈折率差  $\Delta n$  が 2.1 % であるサンプルについての上記関係をそれぞれ示す。

## 【 0 0 3 6 】

また、図 6 において実線で囲まれた範囲は、実効カットオフ波長が  $1.1 \mu\text{m}$  以上かつ  $1.48 \mu\text{m}$  以下、零分散波長が  $1.3 \mu\text{m}$  以上かつ  $1.48 \mu\text{m}$  以下となる範囲を示す。一方、図 6 において破線で囲まれた範囲は、実効カットオフ波長が  $1.03 \mu\text{m}$  以上かつ  $1.48 \mu\text{m}$  以下、零分散波長が  $1.3 \mu\text{m}$  以上かつ  $1.48 \mu\text{m}$  以下となる範囲を示す。実効カットオフ波長の下限  $1.1 \mu\text{m}$  は、曲げロス増加を抑制するための条件であり、実効カットオフ波長の上限  $1.48 \mu\text{m}$  は、励起光波長での単一モードを保証するための条件である。零分散波長の下限  $1.3 \mu\text{m}$  は、信号波長における波長分散の発生を抑制するための条件であり、零分散波長の上限  $1.48 \mu\text{m}$  は、非縮退型四光波混合の発生を抑制するための条件である。

## 【 0 0 3 7 】

次に、光ファイバ増幅器 1 及び増幅用光ファイバ 3 1 の具体的な実施例について説明する。用意される光ファイバ増幅器は、増幅用光ファイバ 3 1 として、3 種類の EDF 1、EDF 2 及び EDF 3 のうちのいずれかが適用される。順方向に励起光を供給する励起光源 5 0 は、出力波長が  $1.48 \mu\text{m}$  であって、出力パワーが  $360 \text{ mW}$  であった。逆方向に励起光を供給する励起光源 5 1 は、出力波長が  $1.48 \mu\text{m}$  であって、出力パワーが  $270 \text{ mW}$  であった。入力端 1 1 に入

力される多重化信号は2チャンネル信号（2波長の多重化信号）であって、一方の信号波長はCバンドに属する1574.5nmであり、他方の信号波長はLバンドに属する1609.0nmであった。入力端11に入力された各信号光のパワーは0dBmとし、出力端12から出力される各信号光のパワーは22.3dBmとした。また、動作温度を25℃とした。

## 【0038】

図8は、3種類のEDF1、EDF2及びEDF3に関し、これらの諸元がまとめられた表である。EDF1は、1.12%の比屈折率差 $\Delta n$ 、1.37 $\mu\text{m}$ の実効カットオフ波長、1.38 $\mu\text{m}$ （励起光波長以下）の零分散波長、波長1.55 $\mu\text{m}$ において5.74 $\mu\text{m}$ のモードフィールド径を有する。また、EDF1において、コア領域311に添加されたErの濃度は912wt.ppm、Alの濃度は3.9wt%であった。EDF2は、1.34%の比屈折率差 $\Delta n$ 、1.28 $\mu\text{m}$ の実効カットオフ波長、1.57 $\mu\text{m}$ （励起光波長と信号波長との間）の零分散波長、波長1.55 $\mu\text{m}$ において5.46 $\mu\text{m}$ のモードフィールド径を有する。また、EDF2において、コア領域311に添加されたErの濃度は1140wt.ppm、Alの濃度は6.2wt%であった。EDF3は、0.71%の比屈折率差 $\Delta n$ 、0.83 $\mu\text{m}$ の実効カットオフ波長、1.65 $\mu\text{m}$ （信号波長以上）の零分散波長、波長1.55 $\mu\text{m}$ において7.81 $\mu\text{m}$ のモードフィールド径を有する。また、EDF3において、コア領域311に添加されるErの濃度は790wt.ppm、Alの濃度は3.5wt%であった。

## 【0039】

図9は、3種類のEDF1、EDF2及びEDF3が適用された光ファイバ増幅器それぞれから出力される光のパワースペクトルである。なお、G910は、EDF1が適用された光ファイバ増幅器からの出力光、G920は、EDF2が適用された光ファイバ増幅器からの出力光、G930は、EDF3が適用された光ファイバ増幅器からの出力光それぞれのパワースペクトルを示す。

## 【0040】

これらスペクトルから分かるように、励起光波長と信号波長との間に零分散波長が存在するEDF2が適用された光ファイバ増幅器では、波長1583nm付



近に非縮退型四光波混合により生じた光の成分が現れた（図 9 中の矢印で示された部分）。これに対して、励起光波長と信号波長との間に零分散波長が存在しない E D F 1 あるいは E D F 3 が適用された光ファイバ増幅器では、非縮退型四光波混合の影響が現れなかった。また、E D F 3 は、実効カットオフ波長が  $0.83\text{ }\mu\text{m}$  と小さいので、波長  $1.55\text{ }\mu\text{m}$  における曲げロス（巻き径  $35\text{ mm}$ 、長さ  $67\text{ m}$ ）が  $1.3\text{ dB}$  程度と大きく、実用上問題があることが確認された。

## 【 0 0 4 1 】

## （第 2 実施形態）

次に、この発明に係る増幅用光ファイバ及び光ファイバ増幅器の第 2 実施形態について説明する。図 10 は、この第 2 実施形態に係る光ファイバ増幅器 2 の構成を示す図である。光ファイバ増幅器 2 は、入力端 1 1 から出力端 1 2 へ向けて順に、光アイソレータ 2 1、増幅用光ファイバ 3 1、光カップラ 4 1、増幅用光ファイバ 3 2 及び光カップラ 4 2 が設けられている。

## 【 0 0 4 2 】

光カップラ 4 1 には励起光源 5 1 が接続されており、また、光カップラ 4 2 には励起光源 5 2 が接続されている。光アイソレータ 2 1 は、入力端 1 1 から増幅用光ファイバ 3 1 への順方向には光を通過させるが、逆方向には光を通過させない。増幅用光ファイバ 3 1、3 2 それぞれは、石英系の光ファイバであって、光導波領域に希土類元素（例えば E r 元素）が添加されており、励起光（例えば波長  $1.48\text{ }\mu\text{m}$  の光）が供給されることにより信号光（例えば C バンドあるいは L バンドに属する光）を増幅する。光カップラ 4 1 は、励起光源 5 1 より到達した励起光を増幅用光ファイバ 3 1 へ出力し、増幅用光ファイバ 3 1 より到達した信号光を増幅用光ファイバ 3 2 へ出力する。光カップラ 4 2 は、励起光源 5 2 より到達した励起光を増幅用光ファイバ 3 2 へ出力し、増幅用光ファイバ 3 2 より到達した信号光を出力端 1 2 へ出力する。励起光源 5 1、5 2 それぞれは、例えば半導体レーザ光源であり、増幅用光ファイバ 3 1、3 2 に添加された希土類元素を励起し得る波長の励起光を出力する。

## 【 0 0 4 3 】

光ファイバ増幅器 2 において、励起光源 5 1 から出力された励起光は、光カプ

ラ 4 1 を経て増幅用光ファイバ 3 1 に逆方向に供給される。また、励起光源 5 2 から出力された励起光は、光カプラ 4 2 を経て増幅用光ファイバ 3 2 に逆方向に供給される。入力端 1 1 に入力された信号光は、光アイソレータ 2 1 を通過して増幅用光ファイバ 3 1 に入射し、この増幅用光ファイバ 3 1 において増幅される。増幅用光ファイバ 3 1 から出力された信号光（増幅された信号光）は、光カプラ 4 1 を経て増幅用光ファイバ 3 2 に入射され、増幅用光ファイバ 3 2 において更に増幅される。そして、増幅用光ファイバ 3 2 から出力された信号光（増幅された信号光）は、光カプラ 4 2 を経て出力端 1 2 より出力される。

## 【 0 0 4 4 】

この第 2 実施形態に係る増幅用光ファイバ 3 1、3 2 それぞれは、上述の第 1 実施形態に係る増幅用光ファイバ 3 1 と同様の構造を備える（図 2（a）及び（b）参照）。したがって、この第 2 実施形態も、非縮退型四光波混合の発生を効果的に抑制する。特にこの第 2 実施形態では、信号光のパワーが最も大きくなる最終段の増幅用光ファイバ 3 2 に、この発明に係る増幅用光ファイバが適用されるので、非縮退型四光波混合の発生が効果的に抑制される。

## 【 0 0 4 5 】

さらに発明者らは、この発明に係る増幅用光ファイバについて、多重化信号間で発生する通常の四光波混合に対する抑制効果についても検討した。

## 【 0 0 4 6 】

増幅用光ファイバとして用意されたサンプルは、1 3 2 9 n m の実効カットオフ波長、波長 1 5 5 0 n m において 5 . 6  $\mu$  m のモードフィールド径、1 3 8 2 . 5 n m の零分散波長を有する第 1 サンプル、1 3 3 7 n m の実効カットオフ波長、波長 1 5 5 0 n m において 5 . 6 2  $\mu$  m のモードフィールド径、1 3 8 2 . 5 n m の零分散波長を有する第 2 サンプル、1 2 5 6 n m の実効カットオフ波長、波長 1 5 5 0 n m において 5 . 4  $\mu$  m のモードフィールド径、1 4 4 2 . 5 n m の零分散波長を有する第 3 サンプル、1 2 8 7 n m の実効カットオフ波長、波長 1 5 5 0 n m において 5 . 3 1  $\mu$  m のモードフィールド径、1 4 5 7 . 5 n m の零分散波長を有する第 4 サンプルである。また、第 1 サンプルの四光波混合クロストークは 3 7 . 4 7 1 d B、第 2 サンプルの四光波混合クロストークは 3 9

． 7 3 8 5 d B、第 3 サンプルの四光波混合クロストークは 3 6． 1 3 8 5 d B、第 4 サンプルの四光波混合クロストークは 3 3． 8 7 5 d B であった。図 1 1 は、これら第 1 ～第 4 サンプルの各々について、四光波混合クロストークと零分散波長との関係を示すグラフである。

## 【 0 0 4 7 】

また、発明者らは、これら第 1 ～第 4 サンプルが適用された光ファイバ増幅器それぞれについて、11 チャンネルの多重化信号光（波長 1 5 7 4． 5 n m ～ 1 6 0 0． 6 n m、グリッド間隔 3 0 0 G H z、入力パワー + 3 d B m、出力パワー + 2 9 d B m）に対する増幅特性を測定した。図 1 2 及び図 1 3 は、その測定結果を示す各光ファイバ増幅器からの出力光のパワースペクトルである（図 1 3 は、図 1 2 の拡大図）。なお、図 1 2 及び図 1 3 には、パワースペクトルの違いが明確に分かるよう、第 2 サンプルが適用された光増幅器の出力パワースペクトル（スペクトル G 1 2 1 0、G 1 3 1 0 に相当）及び第 4 サンプルが適用された光増幅器の出力パワースペクトル（スペクトル G 1 2 2 0、G 1 3 2 0 に相当）が示されている。

## 【 0 0 4 8 】

図 1 2 及び図 1 3 に示されたパワースペクトルから分かるように、第 2 サンプルが適用された光ファイバ増幅器に比べて、第 4 サンプルが適用された光ファイバ増幅器では、各信号チャンネル間に通常の四光波混合に起因して発生した光の成分がより顕著に現れた。このような結果を勘案すれば、増幅用光ファイバの零分散波長が 1 5 0 0 n m 以下、より好ましくは 1 4 0 0 n m 以下に設定されることにより、各信号チャンネル間で発生する通常の四光波混合の抑制効果が得られるだけでなく、非縮退型の四光波混合の抑制効果も同時に得られることが分かる。

## 【 0 0 4 9 】

なお、この発明は、上述の実施形態に限定されるものではなく、種々の変形が可能である。例えば、上記実施形態に係る増幅用光ファイバは、光導波領域に希土類元素として E r 元素が添加されたが、他の希土類元素、例えば、T m 元素、P r 元素、N d 元素等が添加されてもよい。

## 【 0 0 5 0 】

## 【発明の効果】

以上のようにこの発明によれば、光ファイバ増幅器には、励起光波長以下、具体的には  $1.5\ \mu\text{m}$  以下の零分散波長を有するとともに、 $1.1\ \mu\text{m}$  以上かつ励起光波長以下、具体的には  $1.1\ \mu\text{m}$  以上かつ  $1.5\ \mu\text{m}$  以下の実効カットオフ波長を有する増幅用光ファイバが適用されるので、通常の四光波混合とともに非縮退型四光波混合の発生をも抑制することができる。また、増幅用光ファイバのコア領域に添加される希土類元素として Er 元素が添加されれば（コア領域の一部に添加される場合も含む）、CバンドあるいはLバンドに属する信号光を増幅するのに適している。コア領域に添加される Er 元素の濃度が  $3000\ \text{wt. ppm}$  以下、好ましくは  $2500\ \text{wt. ppm}$  以下、より好ましくは  $2000\ \text{wt. ppm}$  以下であり、波長  $1.53\ \mu\text{m}$  における吸収損失が  $10\ \text{dB/m}$  以上である場合、濃度消光を起すこと無く短尺化が可能である。このことから、この発明に係る増幅用光ファイバは、Lバンド用 EDFA における光増幅媒体に適している。さらに、波長  $1.55\ \mu\text{m}$  におけるモードフィールド径が  $4.0\ \mu\text{m}$  以上  $9.0\ \mu\text{m}$  以下、好ましくは  $4.0\ \mu\text{m}$  以上  $7.5\ \mu\text{m}$  以下である場合、非線形光学現象の発生がさらに抑制される。

## 【図面の簡単な説明】

## 【図 1】

この発明に係る光ファイバ増幅器における第 1 実施形態の構造を示す図である。

## 【図 2】

この発明に係る増幅用光ファイバにおける断面構造の一例を示す図 (a) 及びその屈折率プロファイル (b) である。

## 【図 3】

図 2 に示された増幅用光ファイバの複数サンプルに関し、波長  $1.55\ \mu\text{m}$  における曲げロスと実効カットオフ波長との関係を示すグラフである。

## 【図 4】

図 2 に示された増幅用光ファイバの波長分散特性を、比較例とともに示すグラフである。

【図 5】

図 2 に示された増幅用光ファイバに関し、変換効率と  $E_r$  濃度との関係を示すグラフである。

【図 6】

図 2 に示された増幅用光ファイバの複数サンプルに関し、零分散波長と実効カットオフ波長との関係を示すグラフである。

【図 7】

図 2 に示された増幅用光ファイバの複数サンプルに関し、波長  $1.55 \mu m$  におけるモードフィールド径と実効カットオフ波長との関係を示すグラフである。

【図 8】

3 種類のサンプル EDF 1、EDF 2 及び EDF 3 それぞれに関し、それらの諸元がまとめられた表である。

【図 9】

3 種類の EDF 1、EDF 2 及び EDF 3 が適用された光ファイバ増幅器それぞれから出力された光のパワースペクトルである。

【図 10】

この発明に係る増幅用光ファイバ増幅器における第 2 実施形態の構造を示す図である。

【図 11】

図 2 に示された増幅用光ファイバの複数サンプルに関し、通常の四光波混合クロストークと零分散波長との関係を示すグラフである。

【図 12】

図 2 に示された増幅用光ファイバの代表的な 3 種類のサンプルがそれぞれ適用された光ファイバ増幅器に関する出力光のパワースペクトルである。

【図 13】

図 12 に示されたパワースペクトルの拡大図である。

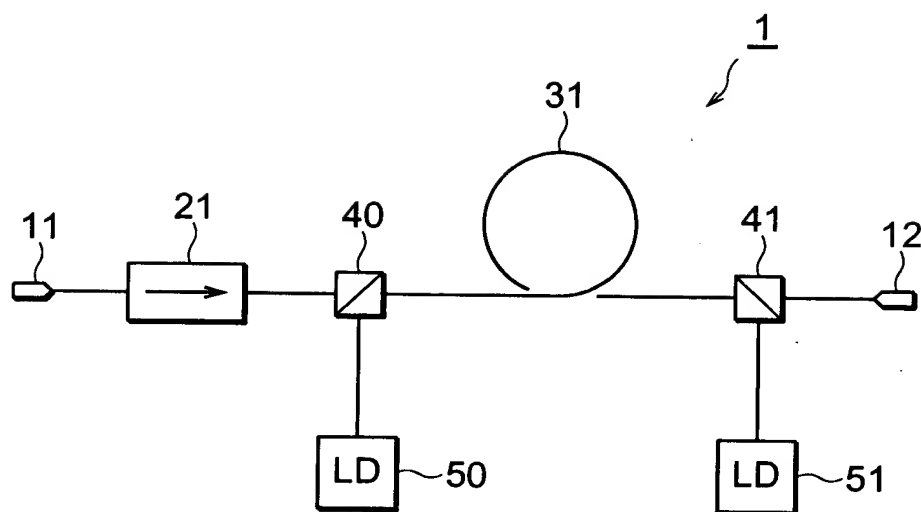
【符号の説明】

1、2…光ファイバ増幅器、11…入力端、12…出力端、21…光アイソレータ、31、32…光増幅用ファイバ、40、41、42…光カップラ、50、

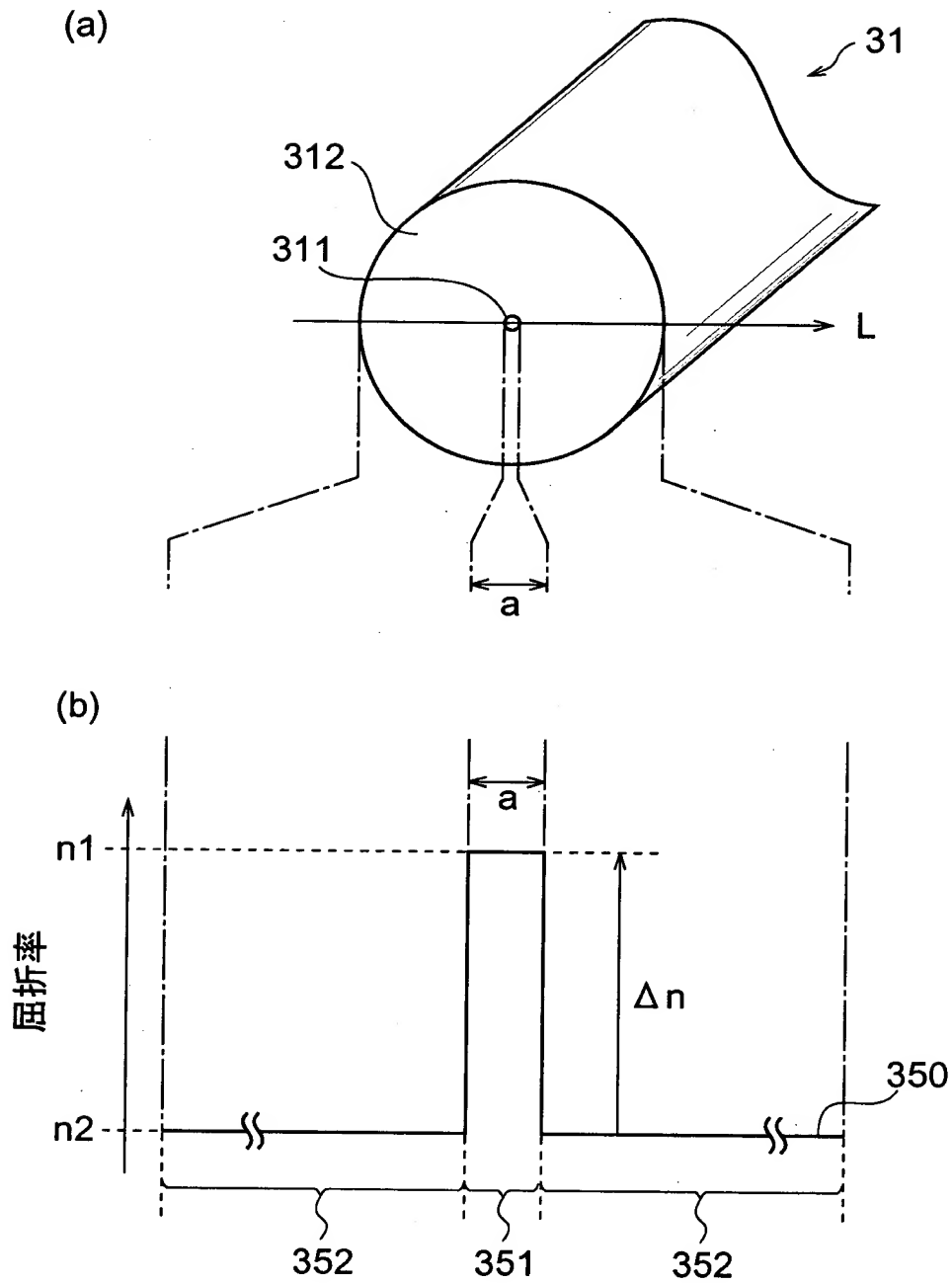
5 1、5 2 …励起光源、3 1 1 …コア領域、3 1 2 …クラッド領域。

【書類名】 図面

【図 1】

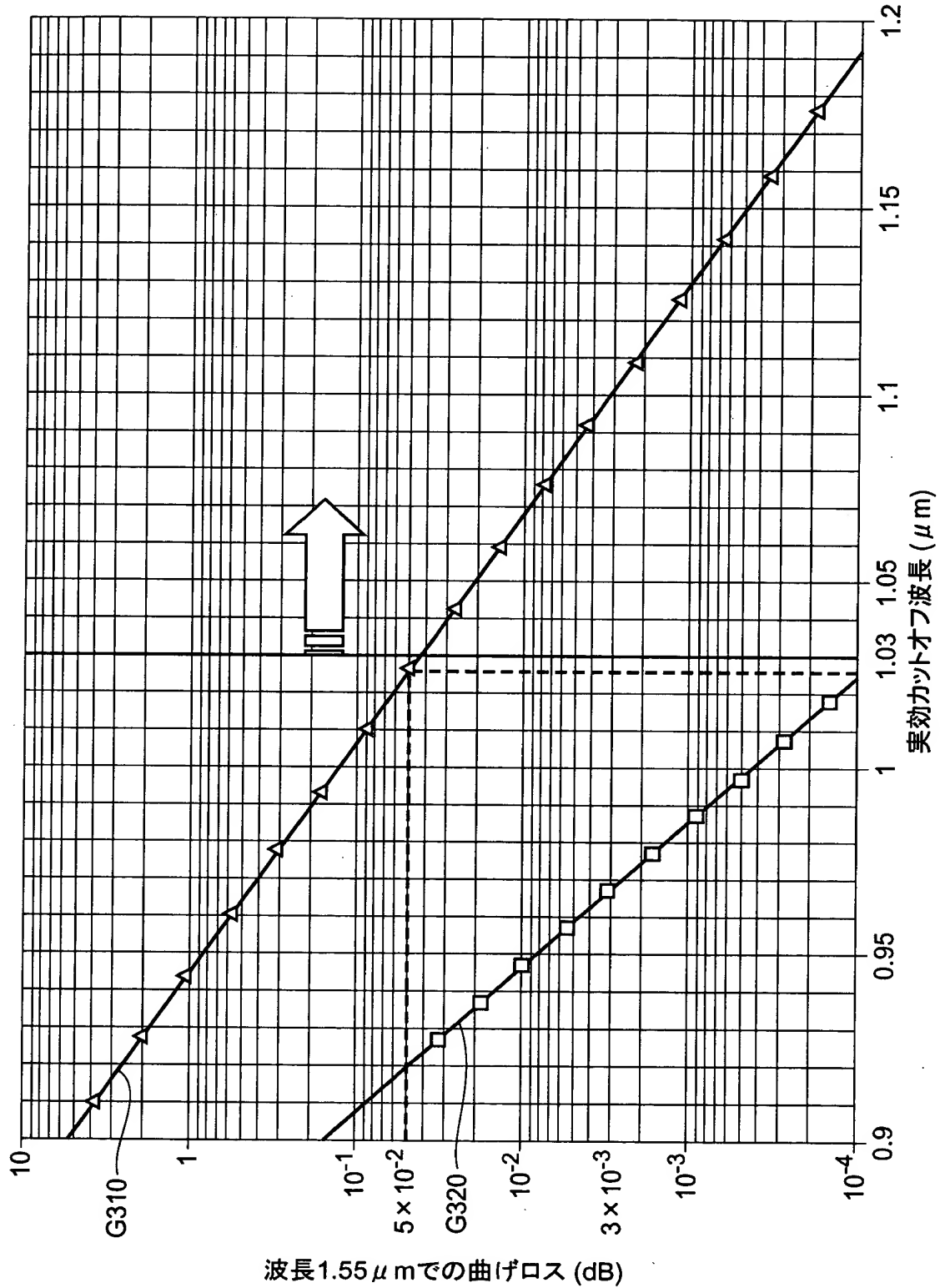


【図 2】

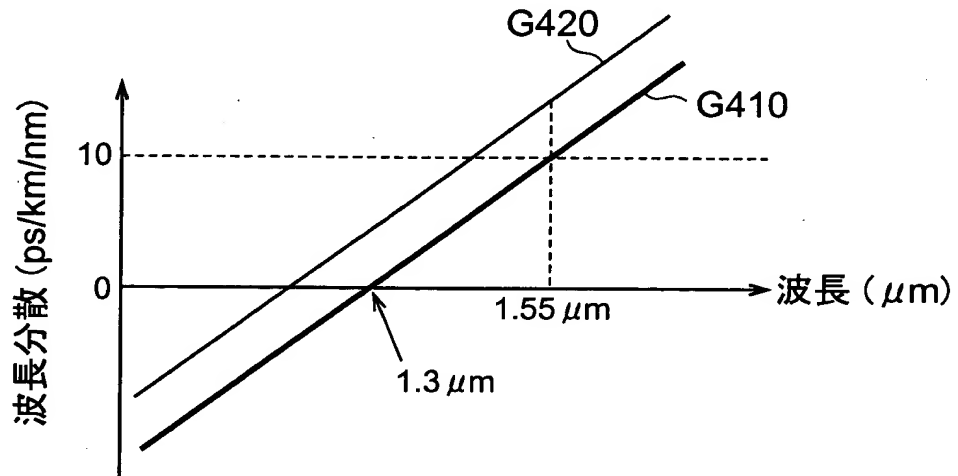




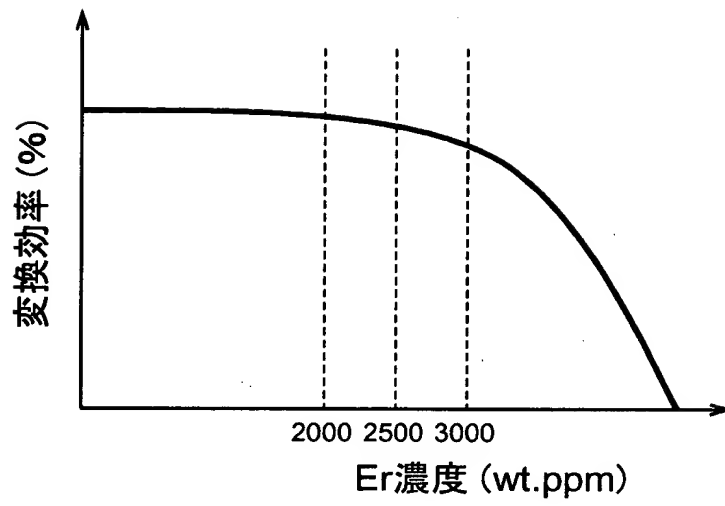
【図 3】



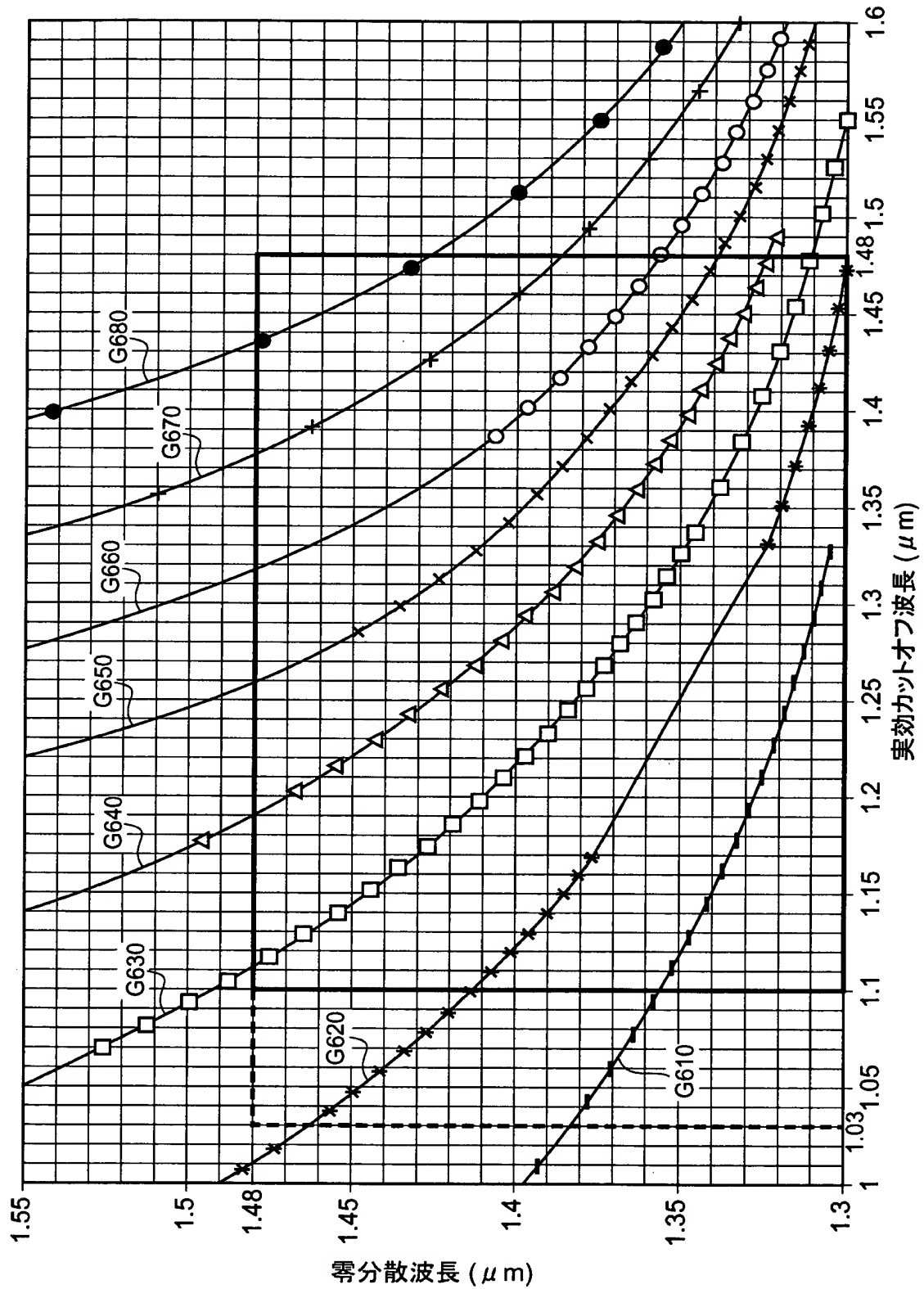
【図 4】



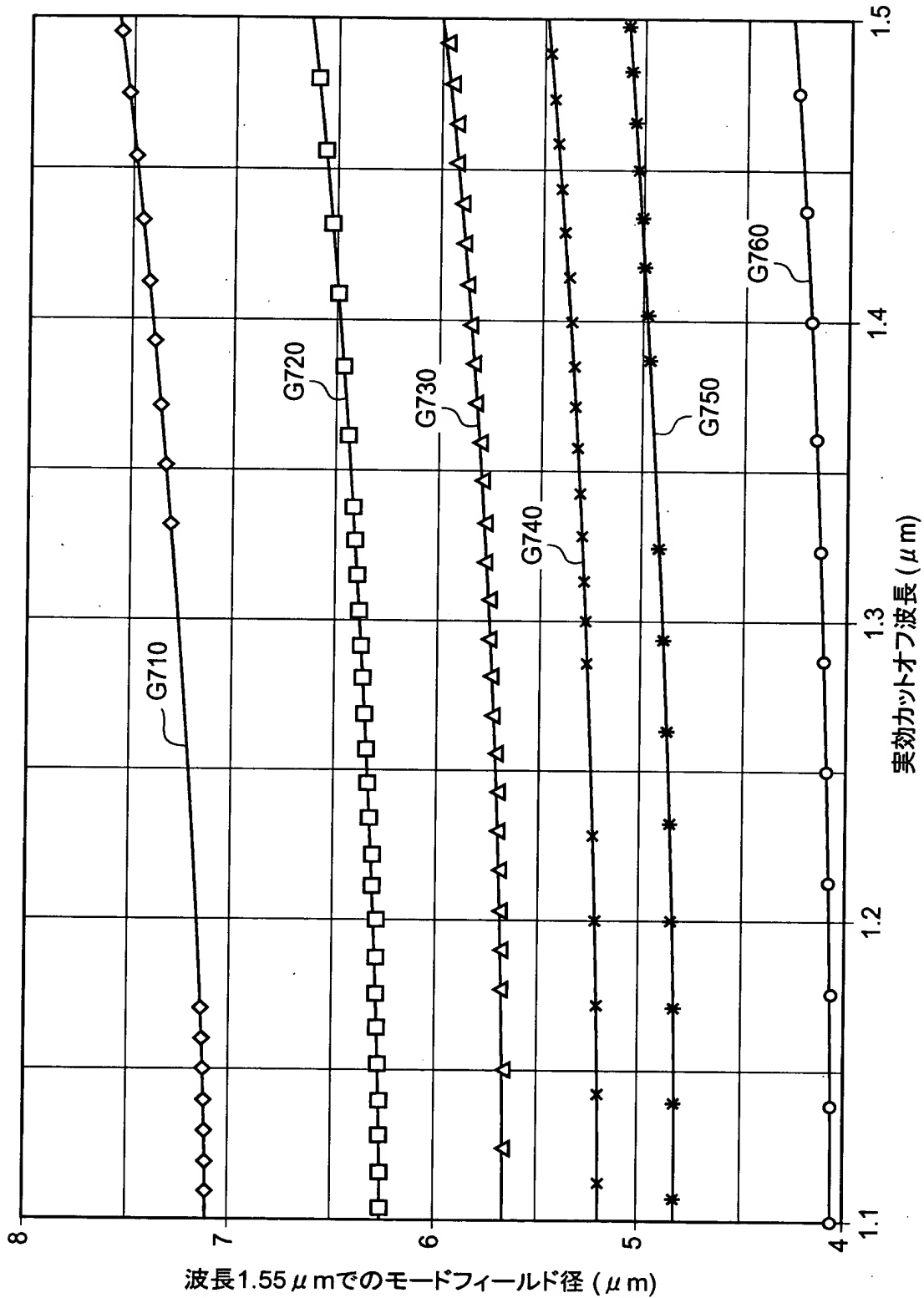
【図 5】



【図 6】



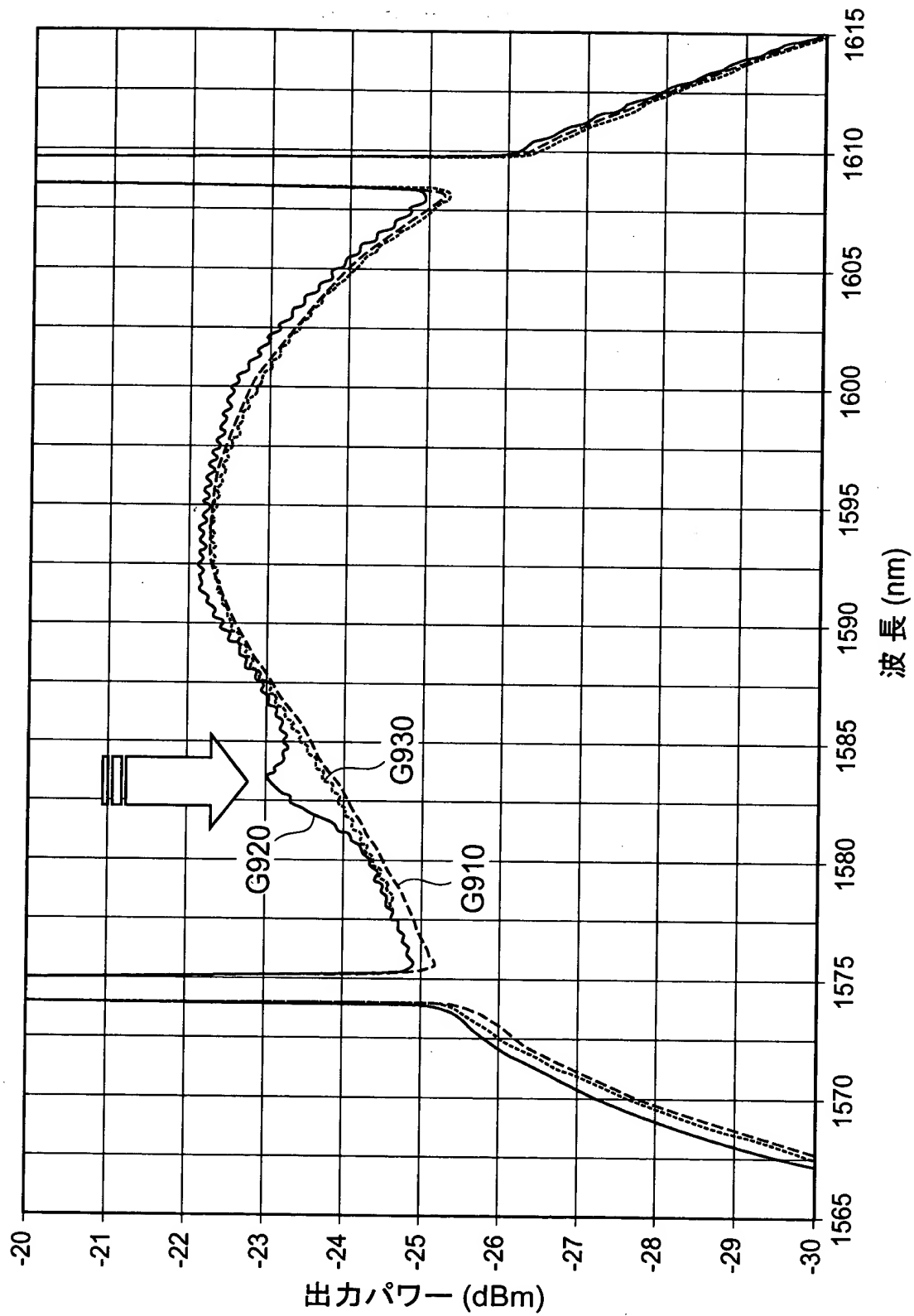
【図 7】



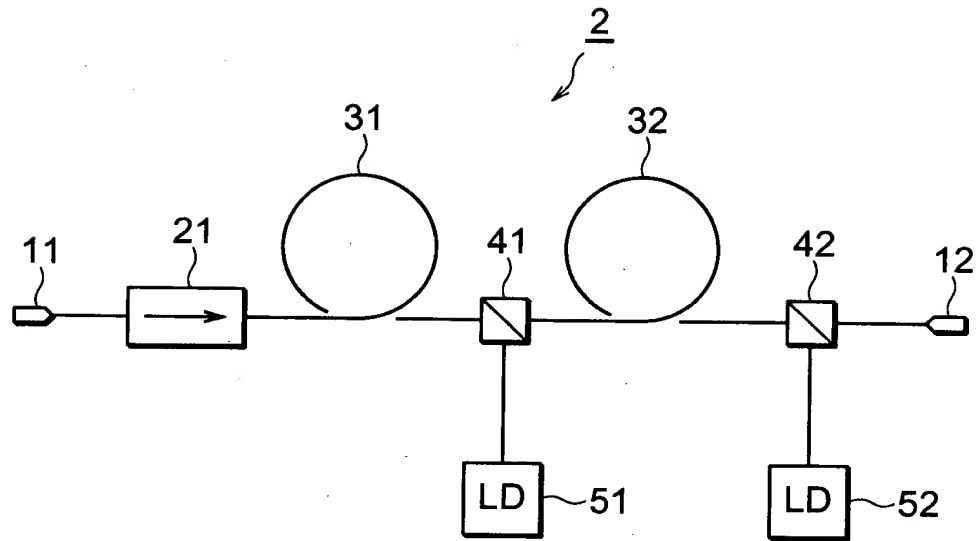
【図 8】

	比屈折率差 $\Delta n(\%)$	実効カットオフ 波長( $\mu\text{m}$ )	零分散波長 ( $\mu\text{m}$ )	モード ファイナード径( $\mu\text{m}$ ) AT1.55 $\mu\text{m}$	Er濃度 (wt.ppm)	Al濃度 (wt%)
EDF1	1.12	1.37	1.38	5.74	912	3.9
EDF2	1.34	1.28	1.57	5.46	1140	6.2
EDF3	0.71	0.83	1.65	7.81	790	3.5

【図 9】

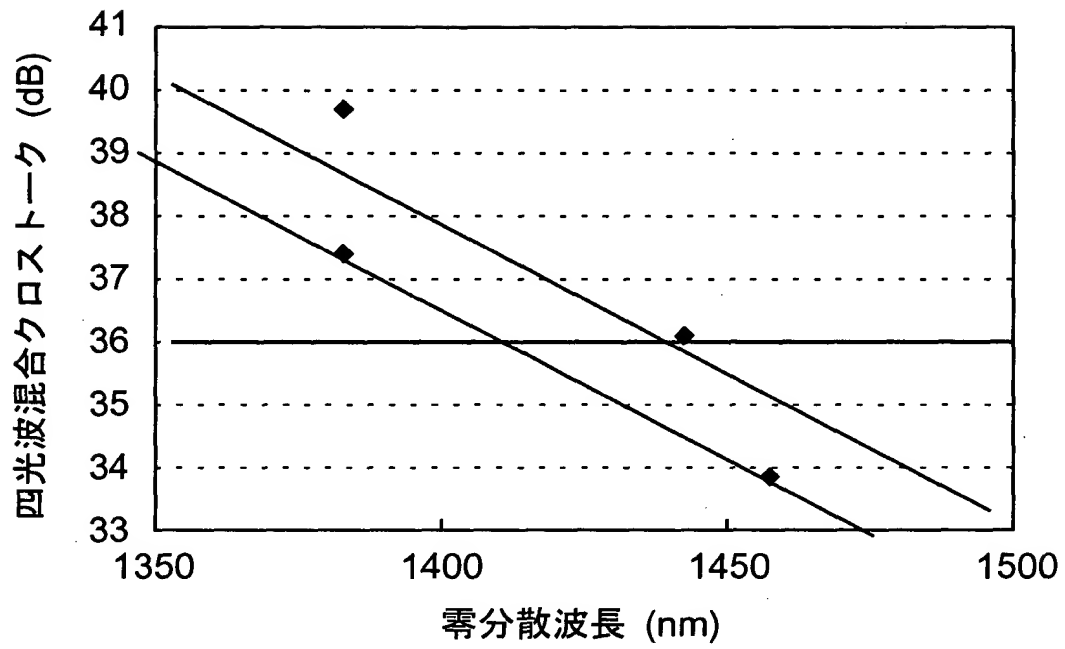


【図 1 0】

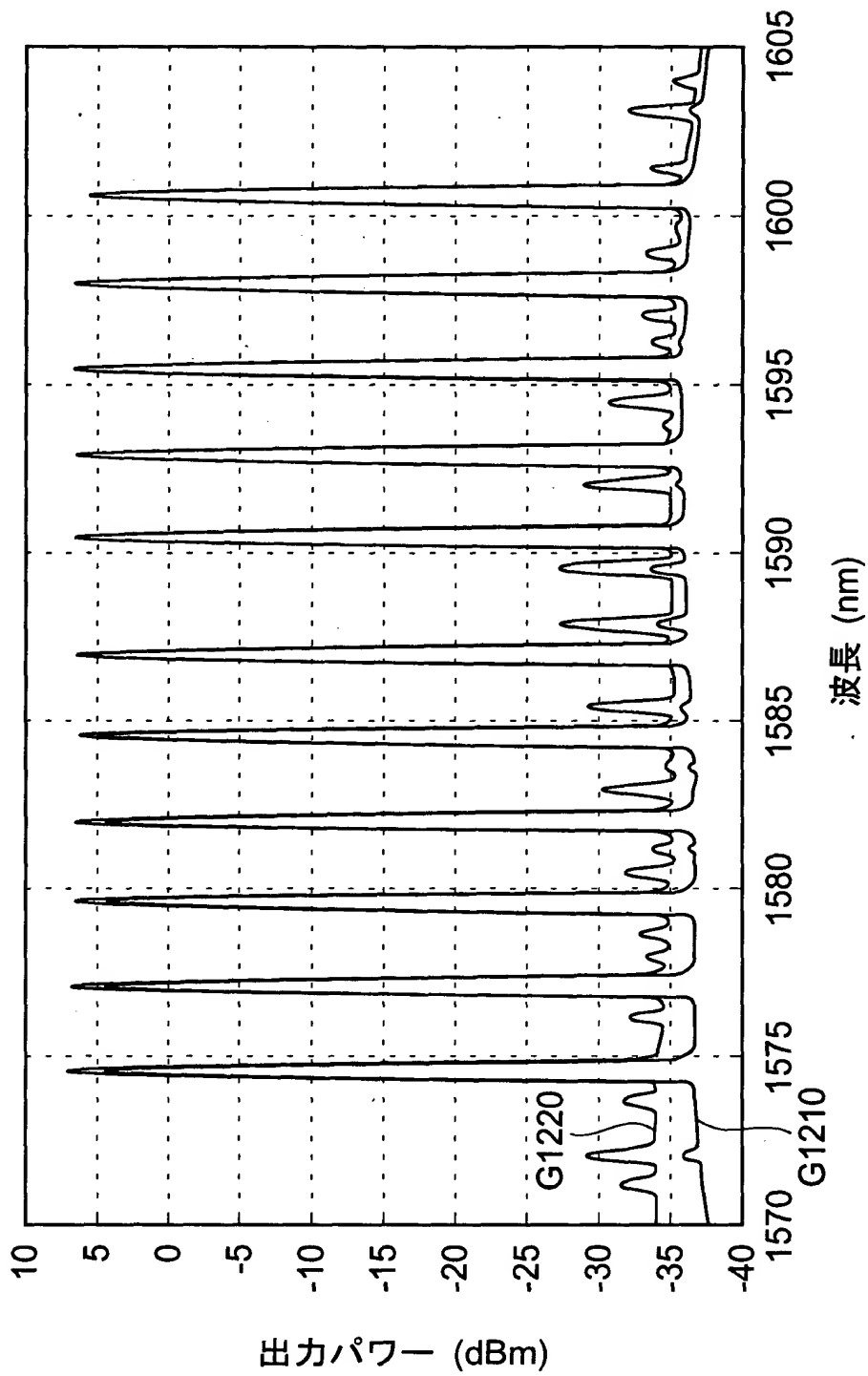




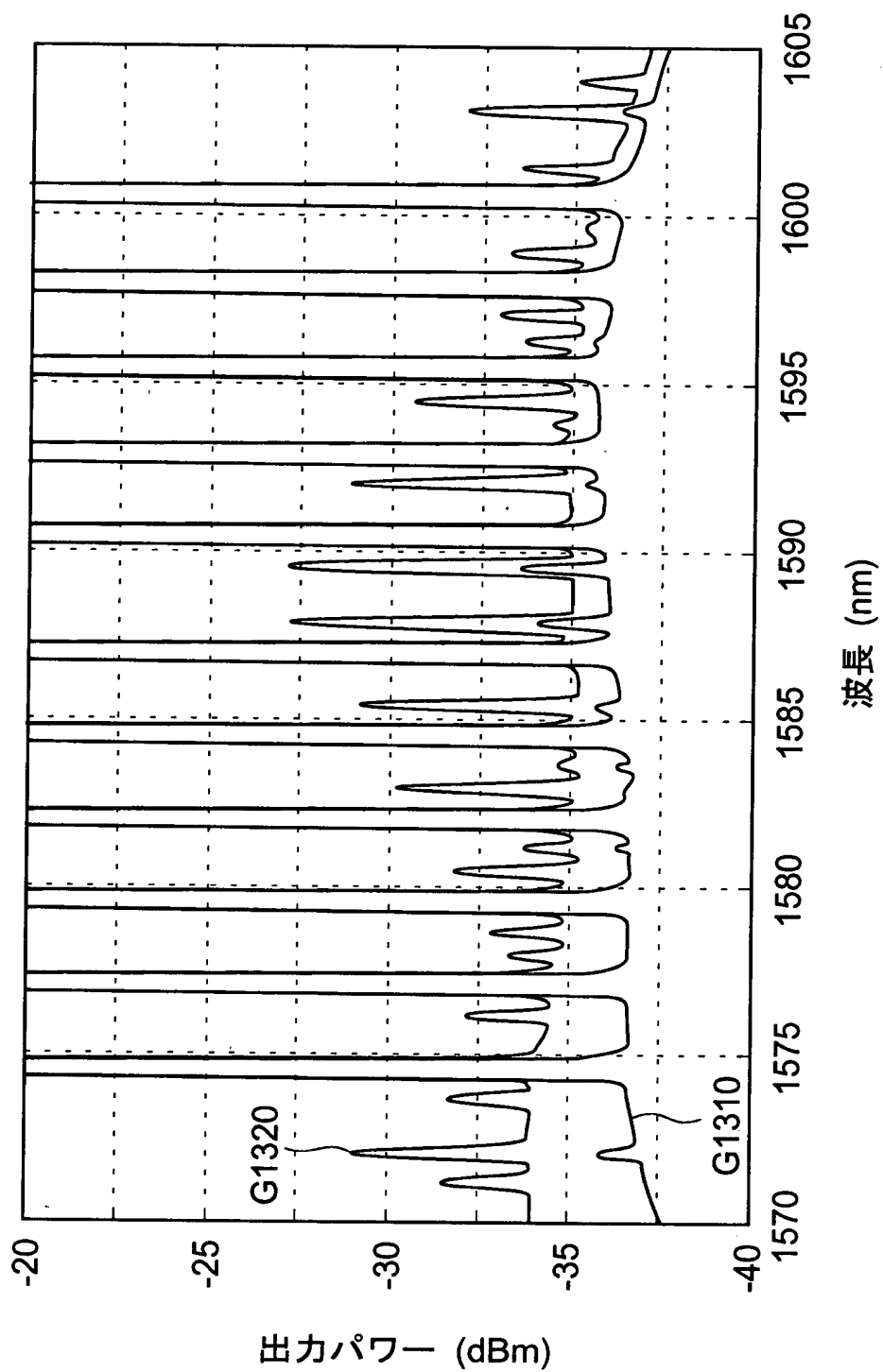
【図 1 1】



【図 12】



【図 13】



【書類名】 要約書

【要約】

【課題】 Lバンドにおける信号増幅に適し、信号間で発生する通常の四光波混合に対して抑制効果を有するのみならず非縮退型四光波混合の発生をも効果的に抑制する構造を備えた増幅用光ファイバ等を提供する。

【解決手段】 この発明に係る光ファイバ増幅器(1)は、希土類元素が添加されたコア領域(311)を備えるとともに、励起光波長以下の零分散波長と、 $1.1\mu\text{m}$ 以上かつ励起光波長以下の実効カットオフ波長を有する増幅用光ファイバ(31, 32)を含む。この増幅用光ファイバ(31, 32)の適用により、通常の四光波混合のみならず非縮退型四光波混合も効果的に抑制される。

【選択図】 図 1

出 願 人 履 歴 情 報

識別番号 [000002130]

1. 変更年月日 1990年 8月29日  
[変更理由] 新規登録  
住 所 大阪府大阪市中央区北浜四丁目5番33号  
氏 名 住友電気工業株式会社